

L'Onde Électromagnétique

Fondements

- émission
- propagation
- interaction

L'émission d'une onde électromagnétique

- Une charge fixe ($v = 0$) génère un champ électrique, constant en un point, mais décroissant avec la distance ($\approx 1/d^2$)
- Une charge en mouvement uniforme ($v = \text{cst}$) engendre un champ électrique et un champ magnétique, constants en un point, mais décroissant avec la distance ($\approx 1/d^2$)
- Une onde électromagnétique est générée par une charge (ou distribution de charges) en mouvement non uniforme vitesse (v) variable et donc accélération (a) non nulle $a \neq 0$

L'émission d'une onde électromagnétique

La matière, globalement neutre, est formée d'agrégats d'atomes qui peuvent être groupées en molécules ou distribués sous forme de réseaux de cohésion plus ou moins forte. Dans les étoiles, où règent les hautes températures, la matière est sous la forme de plasma (particules chargées)

La matière est donc pleine de charges, électrons négatifs plus ou moins libres, noyaux positifs; la stabilité des ensembles est le résultat de divers équilibres évolutifs, tout étant sous l'influence de la **force électromagnétique** .. La force qui régit la stabilité de la matière sous toute ses formes et tous les processus biochimiques du vivant.

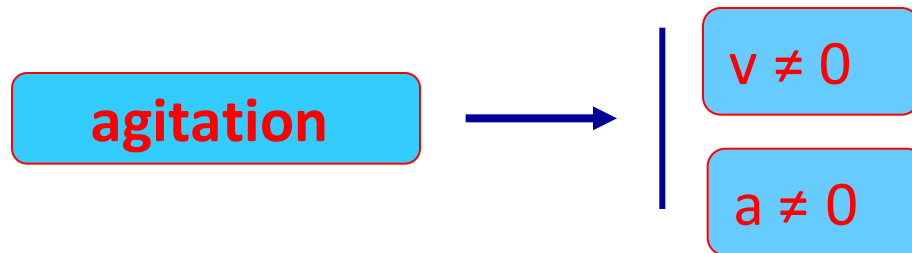
La matière un ensemble de charges

L'émission d'une onde électromagnétique

Tout système physique est naturellement agité avec une énergie

E : $E \approx T,$

ou T est la température du système



**Conclusion: tout système physique émet une
onde électromagnétique**

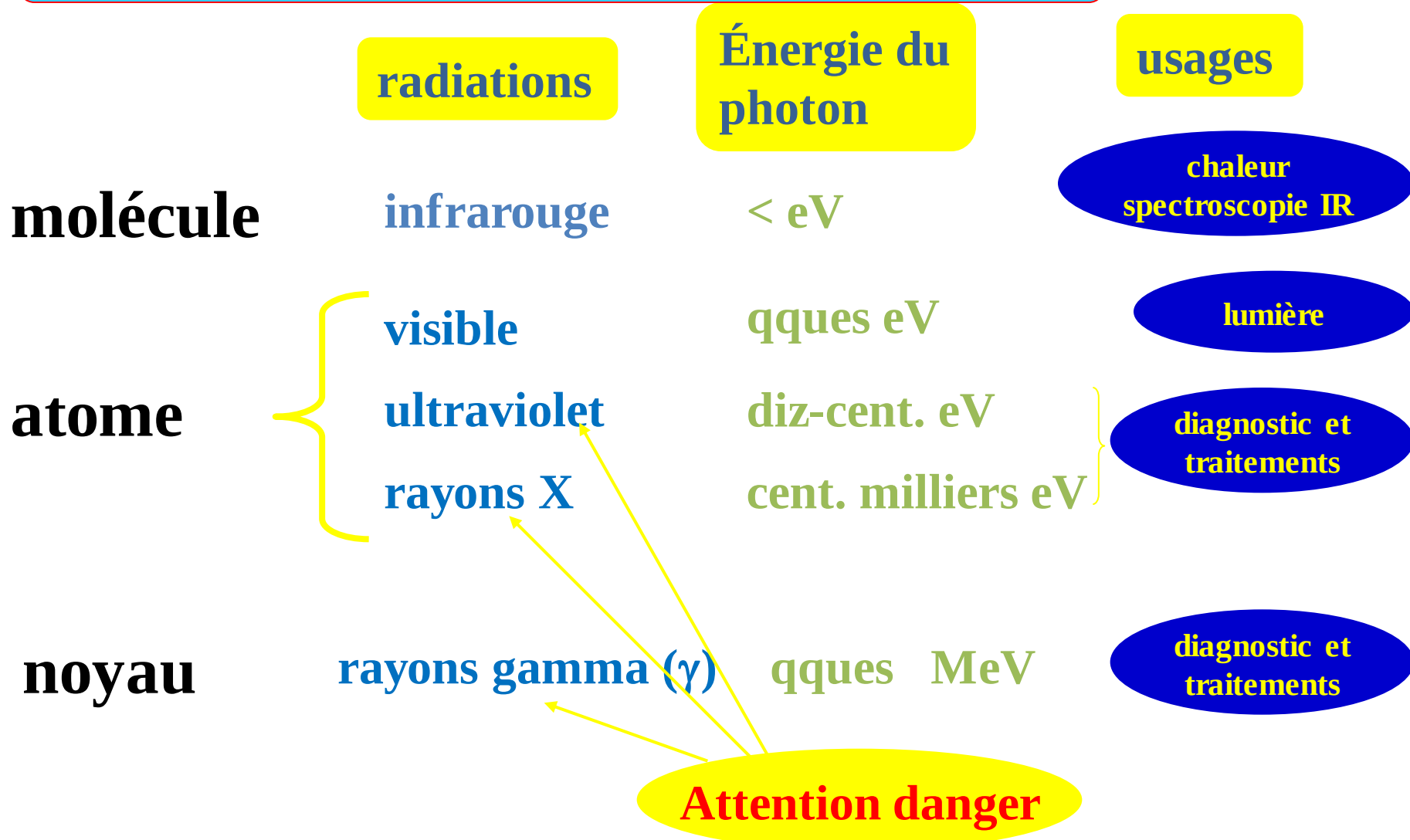
Les émetteurs naturels (1)

Espace: T varie de 3K pour les nuages galactiques les plus froids (le rayonnement fossile du Big Bang est à 2,73K) à plus de $6 \cdot 10^8$ K pour le cœur des étoiles les plus chaudes (super géante rouge).

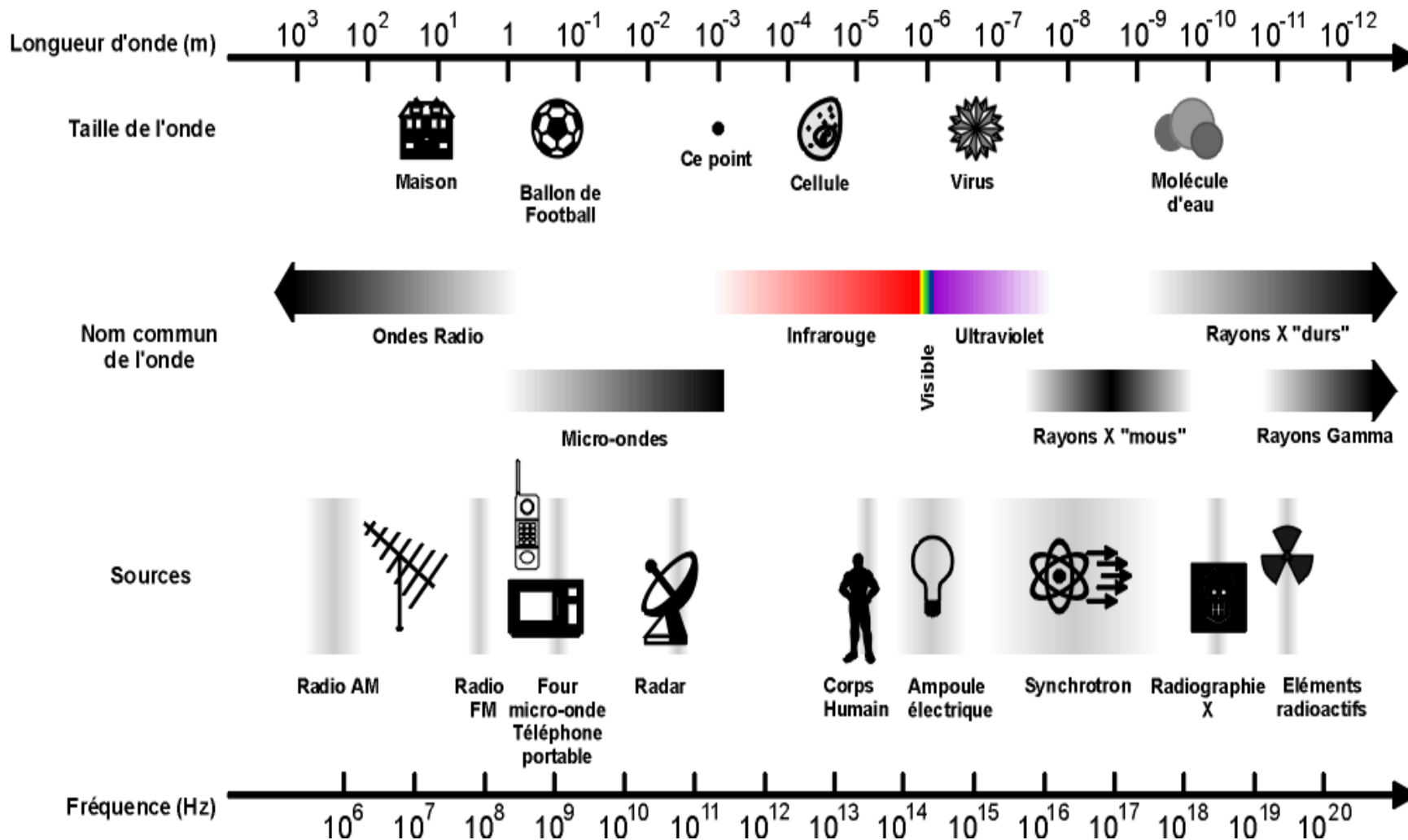
- L'espace est un émetteur d'ondes dans tout le spectre électromagnétique.

Les émetteurs naturels (2)

transition d'état dans un système physique



Les émetteurs anthropiques



La variation de l'indice optique (n) avec le milieu et la fréquence

$$n = c_0/c$$

Les ondes électromagnétiques ont la même vitesse de propagation (célérité) c_0 dans le vide.

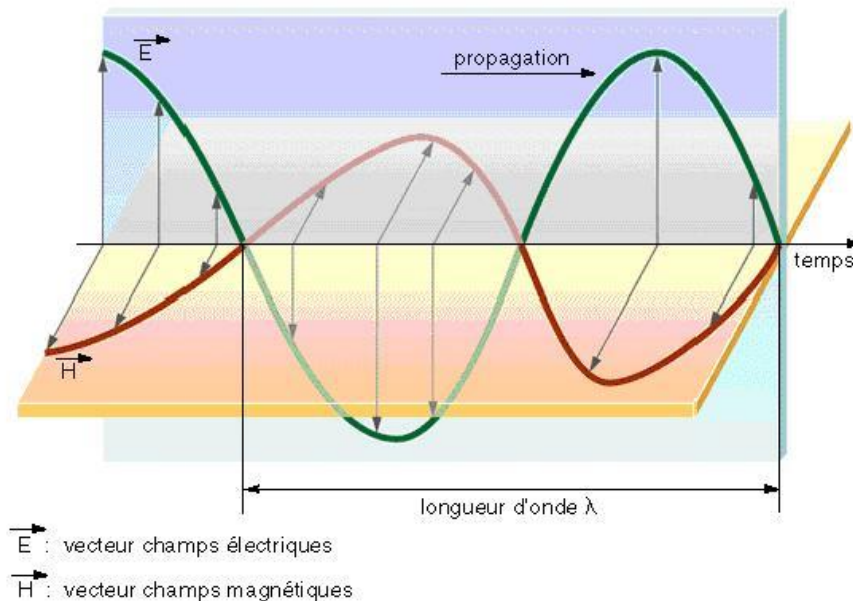
Cela n'est plus vrai dans les milieux de propagation matériels où elle varie :

- avec la nature du milieu
- avec la fréquence (faiblement)

Les célérités différentes engendrent la dispersion des ondes réfractées.

La lumière: onde électromagnétique

une oscillation couplée du champ électrique et du champ magnétique qui se propage



Énergie associée

$$I \approx E^2, B^2$$

**Moitié pour chaque
composante**

Le champs électrique E et le champs magnétique H sont perpendiculaires

Dans le vide la lumière se propage à la vitesse
 $C = 300\,000 \text{ km/s}$

Une onde est caractérisée

par sa fréquence ν (période $T = 1/\nu$)

L'énergie

$$E = h\nu \quad (h \text{ cste de Plank: } 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js})$$

Sa longueur d'onde

$$\lambda = C \cdot T = C/\nu$$

**L'amplitude et la direction (polarisation)
du champs électrique**

•Le rayonnement électromagnétique

- Longueur d'onde (λ en m)

- longueur d'un cycle d'une onde,
distance entre deux crêtes successives
d'une onde

- mesurée en mètres ou sous-multiples

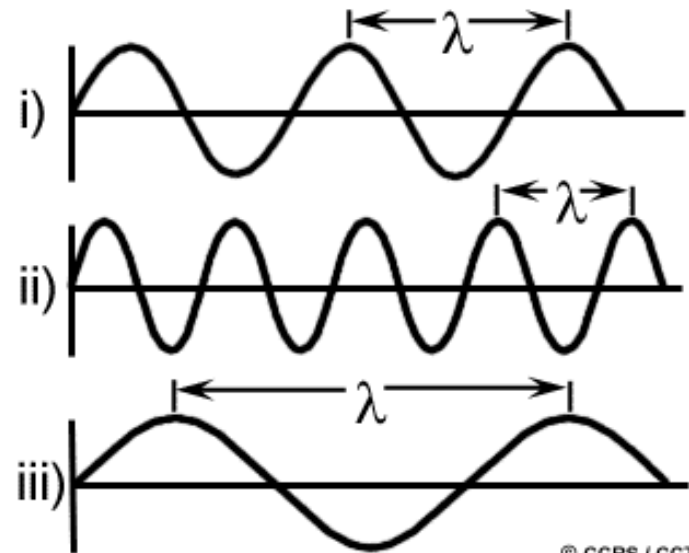
- Fréquence (ν en Hz)

- nombre d'oscillations
par unité de temps

- Inversement
proportionnelles

- $C = \lambda \nu$

- $C = \text{vitesse de la lumière}$



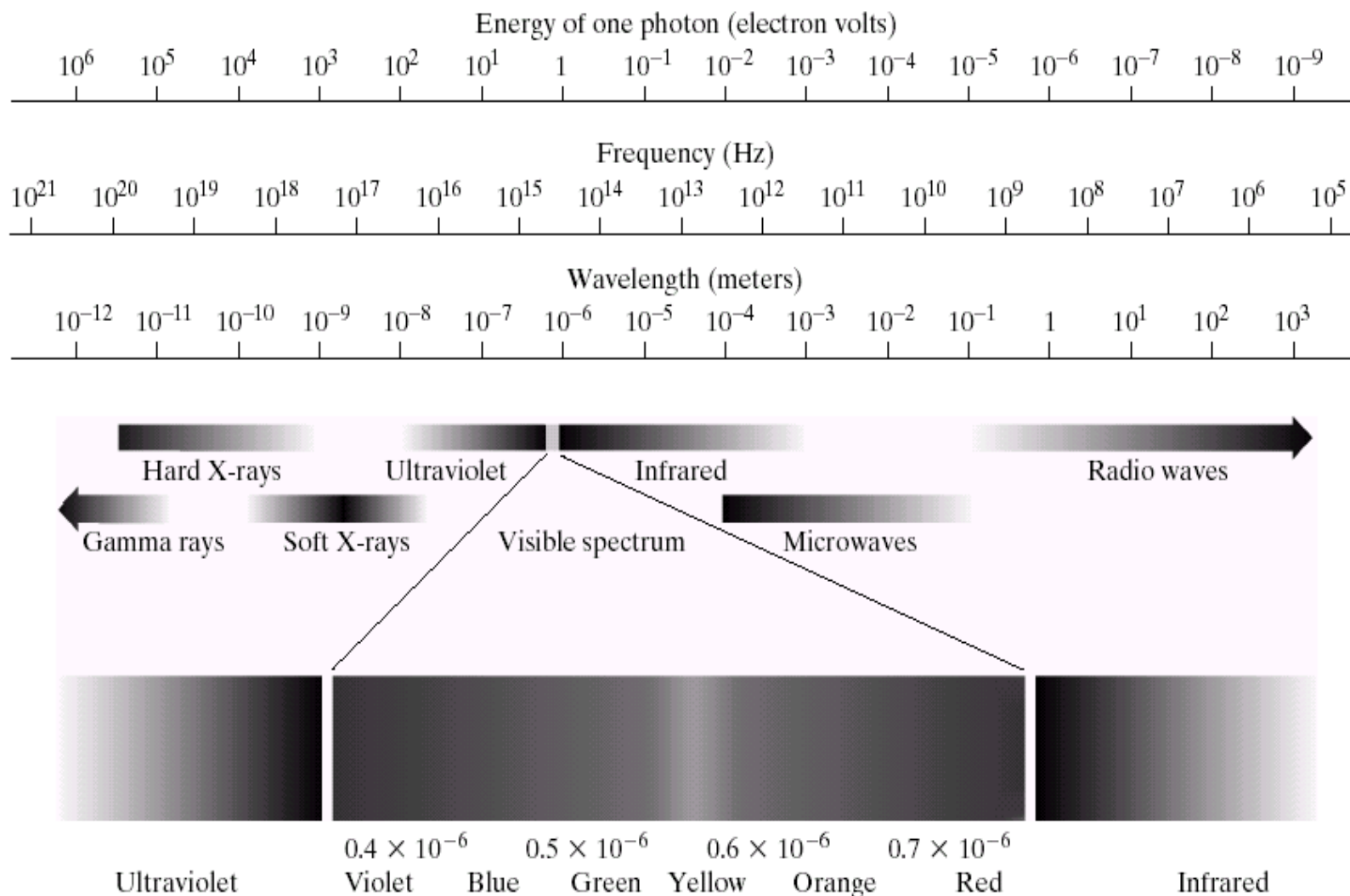
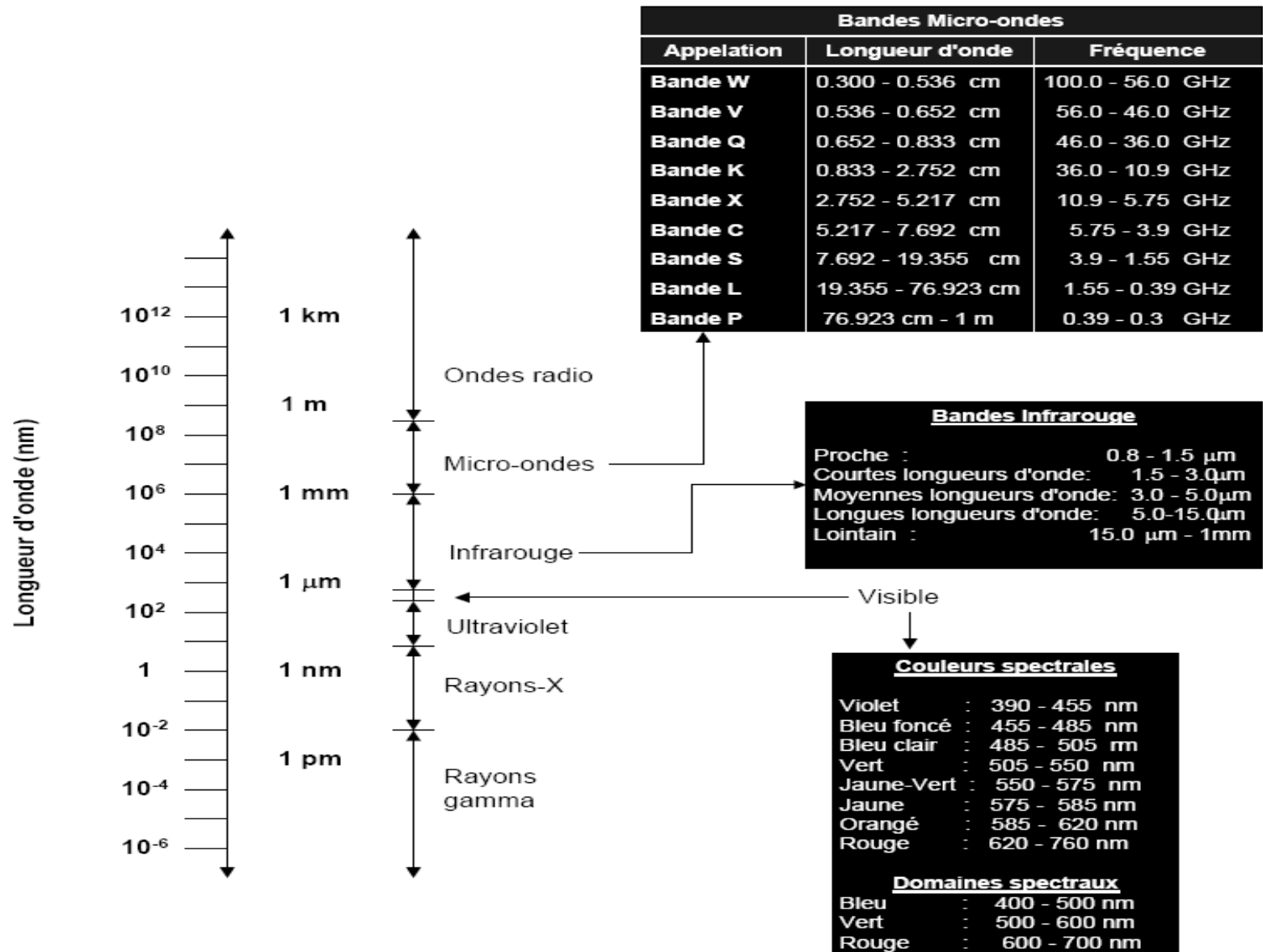


FIGURE 2.10 The electromagnetic spectrum. The visible spectrum is shown zoomed to facilitate explanation, but note that the visible spectrum is a rather narrow portion of the EM spectrum.

LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE



Le rayonnement électromagnétique

- L'infrarouge (0,7 à 100 μm)

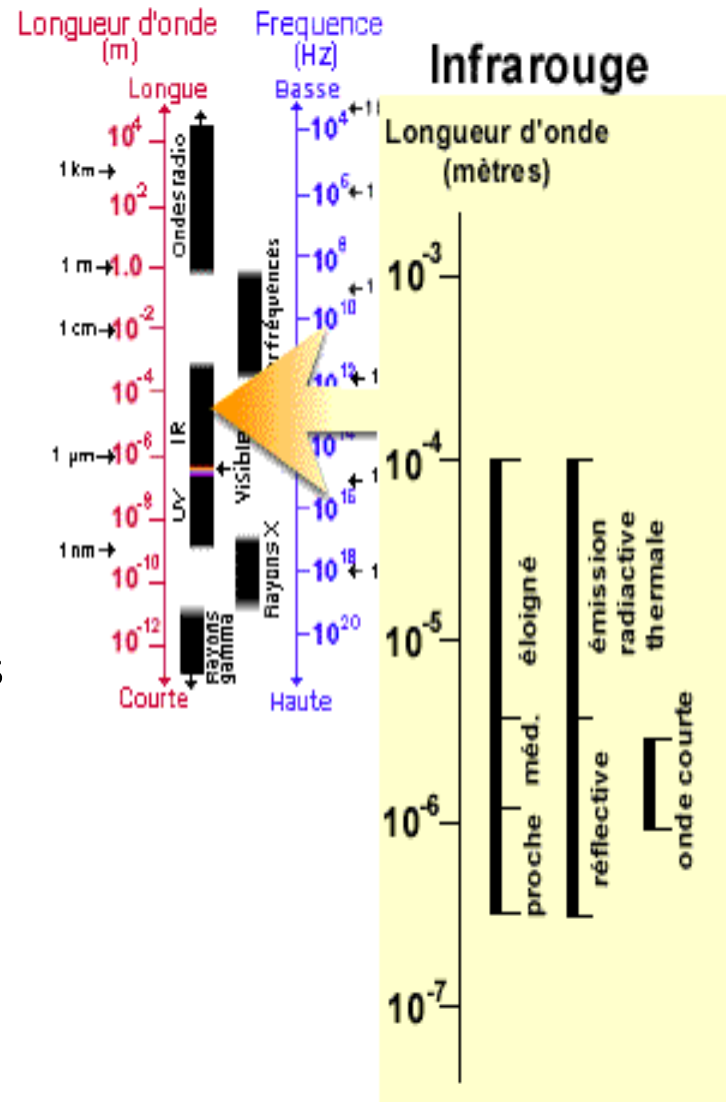
deux catégories

IR réfléchi

utilisé de la même
façon que le visible
de 0,7 à 3 μm

IR émis ou *thermique*

rayonnement émis sous
forme de chaleur par la
surface de la Terre et autres
de 3 à 100 μm

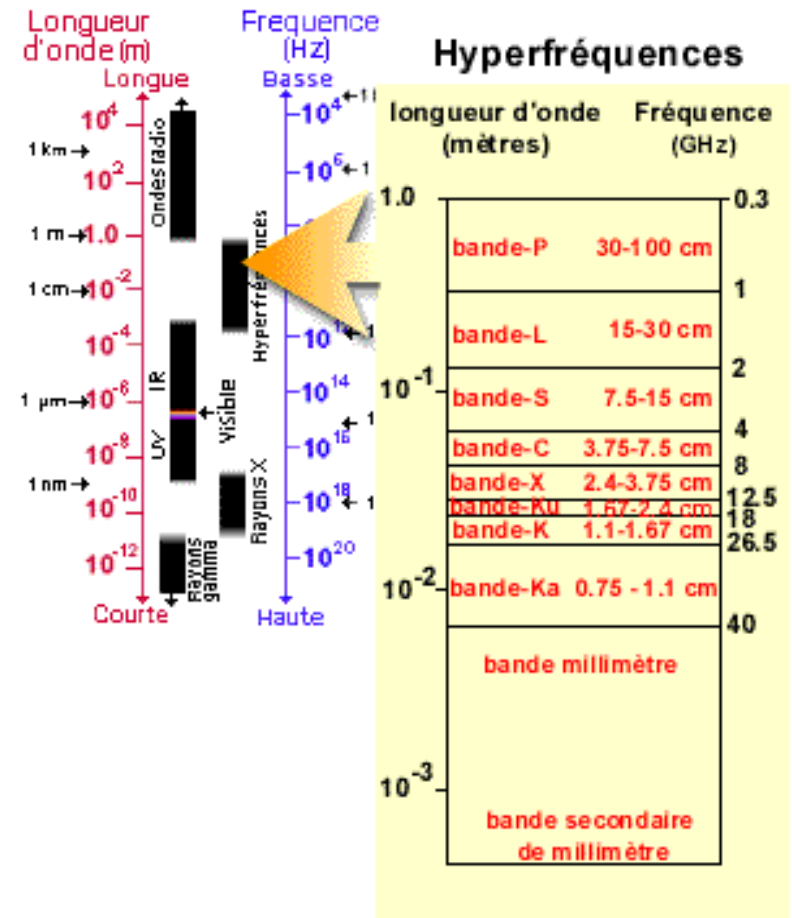


•Le rayonnement électromagnétique

Les hyperfréquences

- micro-ondes
- les plus grandes longueurs d'onde utilisées en télédétection
- de 1 mm à 1 m
- de l'infrarouge thermique aux ondes radio
- 12.24 cm : 2450 MHz pour chauffer sa soupe !

Bande S



Dualité onde-corpuscule

Dualité onde-corpuscule

- La matière (une particule) comme la lumière (un photon) manifeste une dualité de comportement onde-corpuscule

Dualité onde-corpuscule

- La matière (une particule) comme la lumière (un photon) manifeste une dualité de comportement onde-corpuscule
- Relation de de Broglie (1924):

Dualité onde-corpuscule

- La matière (une particule) comme la lumière (un photon) manifeste une dualité de comportement onde-corpuscule
- Relation de **de Broglie (1924)**:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Dualité onde-corpuscule

- La matière (une particule) comme la lumière (un photon) manifeste une dualité de comportement onde-corpuscule
- Relation de **de Broglie (1924)**:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Longueur d'onde

(de de Broglie)

impulsion

Dualité onde-corpuscule

- La matière (une particule) comme la lumière (un photon) manifeste une dualité de comportement onde-corpuscule
- Relation de **de Broglie (1924)**:

The diagram shows the de Broglie equation $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ enclosed in a yellow box. An arrow points from the symbol λ to the text 'Longueur d'onde (de de Broglie)' and 'Attribut ondulatoire'. Another arrow points from the symbol p to the text 'impulsion' and 'Attribut corpusculaire'.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Longueur d'onde
(de de Broglie)

Attribut
ondulatoire

impulsion

Attribut
corpusculaire

Dualité onde-corpuscule

- Pour une balle de 140 g se déplaçant à 40 m/s

$$p = mv = (0.14 \text{ kg})(40 \text{ m/s}) = 5.6 \text{ kg.m/s}$$

$$\lambda = h/p = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}) / (5.6 \text{ kg.m/s}) = 1.2 \times 10^{-34} \text{ m}$$

Dualité onde-corpuscule

- Pour une balle de 140 g se déplaçant à 40 m/s

$$p = mv = (0.14 \text{ kg})(40 \text{ m/s}) = 5.6 \text{ kg.m/s}$$

$$\lambda = h/p = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}) / (5.6 \text{ kg.m/s}) = 1.2 \times 10^{-34} \text{ m}$$

La propriété ondulatoire de cet objet est imperceptible

Dualité onde-corpuscule

- Pour une balle de 140 g se déplaçant à 40 m/s

$$p = mv = (0.14 \text{ kg})(40 \text{ m/s}) = 5.6 \text{ kg.m/s}$$

$$\lambda = h/p = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}) / (5.6 \text{ kg.m/s}) = 1.2 \times 10^{-34} \text{ m}$$

λ imperceptible

- Pour un électron se déplaçant à une vitesse $v=c/100$:

$$p = mv = (9.109 \times 10^{-31} \text{ kg})(2.998 \times 10^6 \text{ m/s}) = 2.73 \times 10^{-24} \text{ kg.m/s}$$

$$\lambda = h/p = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}) / (2.73 \times 10^{-24} \text{ kg.m/s}) = 2.43 \times 10^{-10} \text{ m}$$

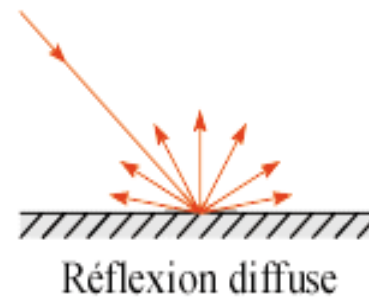
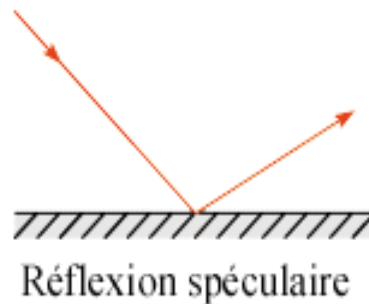
λ comparable aux dimensions atomiques

Propriétés des ondes électromagnétique

- fondamentales en télédétection
 - la réflexion
 - l'absorption
 - la transmission
 - la diffusion
 - l'émission
 - autres propriétés
 - la diffraction
 - La réfraction
 - la polarisation
 - l'effet Doppler
- important en télédétection RADAR
notamment

• Propriétés des ondes électromagnétiques

- la réflexion
 - un corps qui reçoit un REM peut en réfléchir une partie
 - *albédo* : énergie *solaire* réfléchie par une portion d'espace terrestre (% réfléchi)
 - spéculaire ou diffuses



- **Propriétés des ondes électromagnétiques**

- l'absorption

- un corps qui reçoit un REM peut en absorber une partie
 - cette énergie absorbée est transformée et modifie l'énergie interne du corps
 - peut augmenter la température interne du corps
 - les grosses molécules de l'atmosphère (ozone, bioxyde de carbone et vapeur d'eau) absorbent l'énergie de diverses longueurs d'onde

- **Propriétés des ondes électromagnétiques**

- la transmission

- un corps qui reçoit un REM peut en transmettre une partie
 - un objet transparent à une transmittance élevée dans les longueurs d'ondes visibles
 - une surface d'eau pure ou le feuillage d'arbres sont des exemples de surfaces susceptibles de transmettre une partie du REM

• Propriétés des ondes électromagnétiques

• la diffusion

- très grande importance en télédétection
- des particules microscopiques dans l'atmosphère amènent la diffusion dans toutes les directions d'une partie du REM
- le REM traversant ce milieu peut alors être considérablement transformé.
- environ 25% du rayonnement solaire qui traverse l'atmosphère est diffusé

- peut être beaucoup plus important lorsque l'atmosphère est chargée en aérosols et vapeur d'eau

•Propriétés des ondes électromagnétiques

•l'émission

- tout corps dont la température thermodynamique est supérieure au zéro absolu (-273 °C) émet un rayonnement électromagnétique
- l'émetteur, appelé aussi source, peut être le soleil, le capteur (RADAR, LIDAR) ou encore la cible (infrarouge thermique).

•Propriétés des ondes électromagnétiques

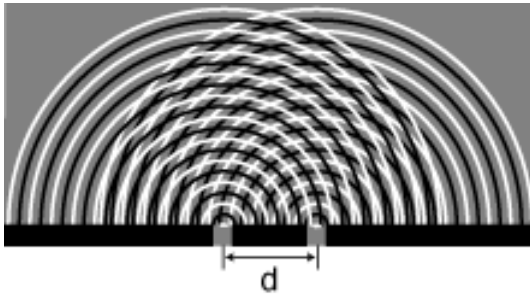
- la diffraction

- déviation de la direction de propagation d'un rayonnement lorsque celui-ci frappe un obstacle ou traverse un trou, une fente ...

- Diffraction au travers d'un nuage chargée de fines gouttelettes d'eau ->

- Diffraction du son

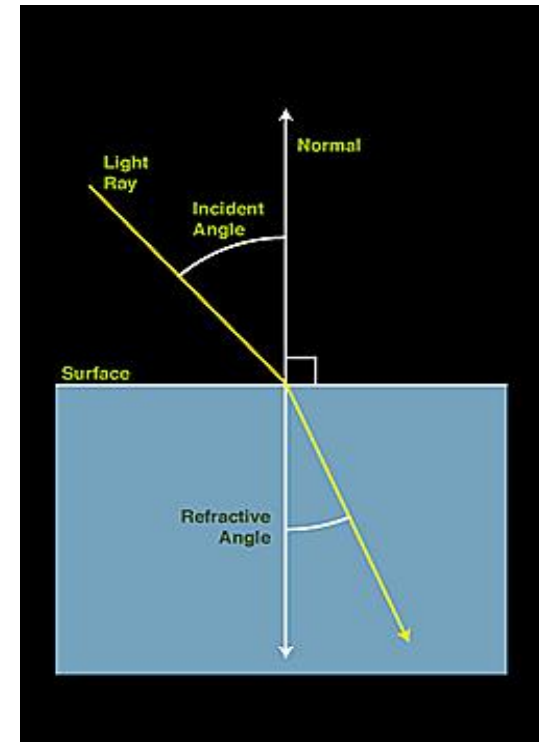
- <-



- **Propriétés des ondes électromagnétiques**

- **la réfraction**

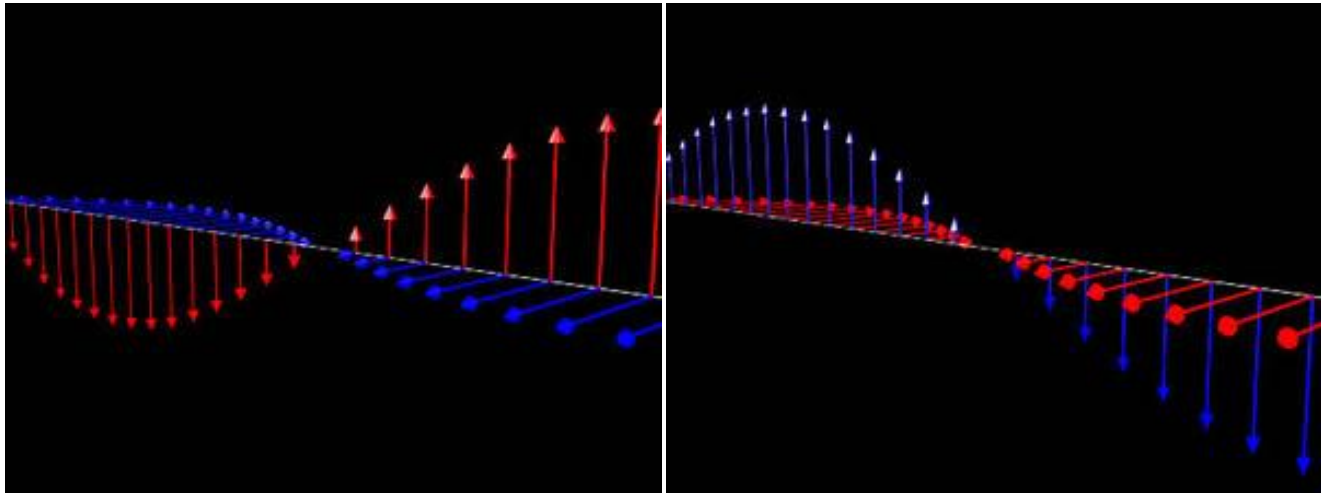
- déviation de la trajectoire d'une onde électromagnétique lors de son passage d'un milieu à un autre (Snell's Law)



•Propriétés des ondes électromagnétiques

•la polarisation

- concerne la variation du plan d'oscillation de l'onde produite par les plans d'eau, les feuilles, les aérosols contenus dans l'atmosphère ... ou les filtres !



Les types d'ondes

- Une onde se définit comme une déformation qui se propage dans le vide ou dans un milieu contenant de la matière
- Les ondes qui ne se propagent que dans de la matière sont appelées: ondes mécaniques
- Les ondes qui peuvent se déplacer dans le vide sont les ondes électromagnétiques

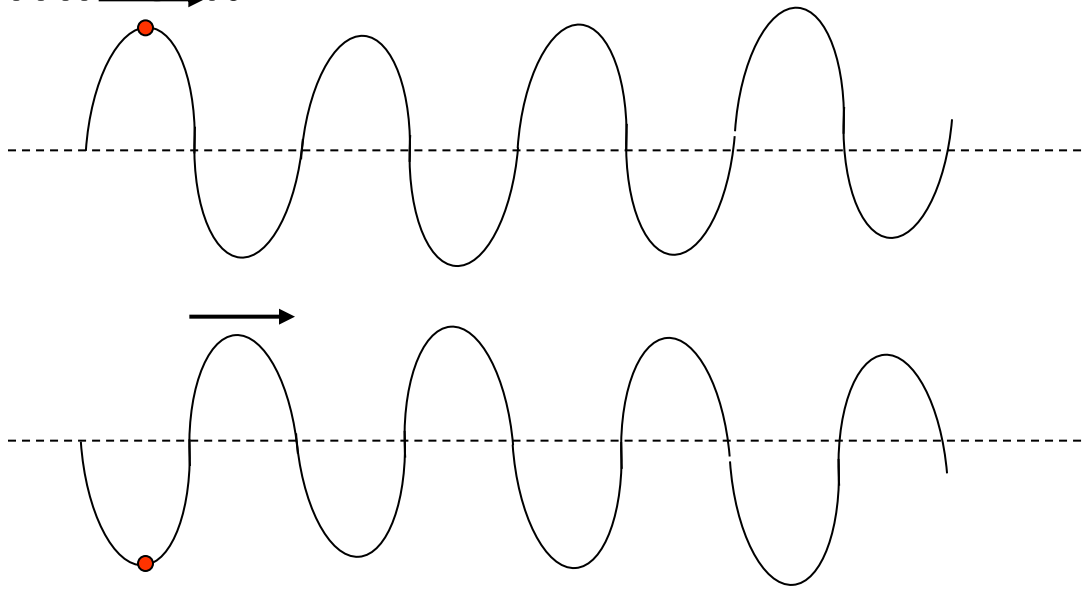
Il existe deux sortes d'ondes:

a) Les ondes transversales

b) Les ondes longitudinales

Les ondes transversales

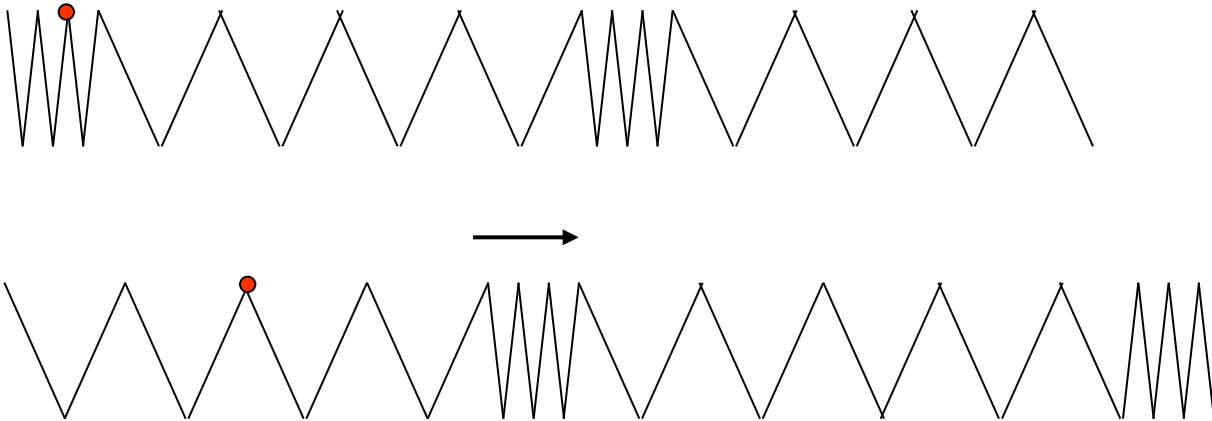
- Les ondes transversales se propagent perpendiculairement au déplacement du milieu.



Déplacement de l'onde de gauche à droite, alors que le point rouge se déplace perpendiculairement à l'onde

Les ondes longitudinales

- Les ondes longitudinales sont des ondes qui se propagent parallèlement au déplacement du milieu.

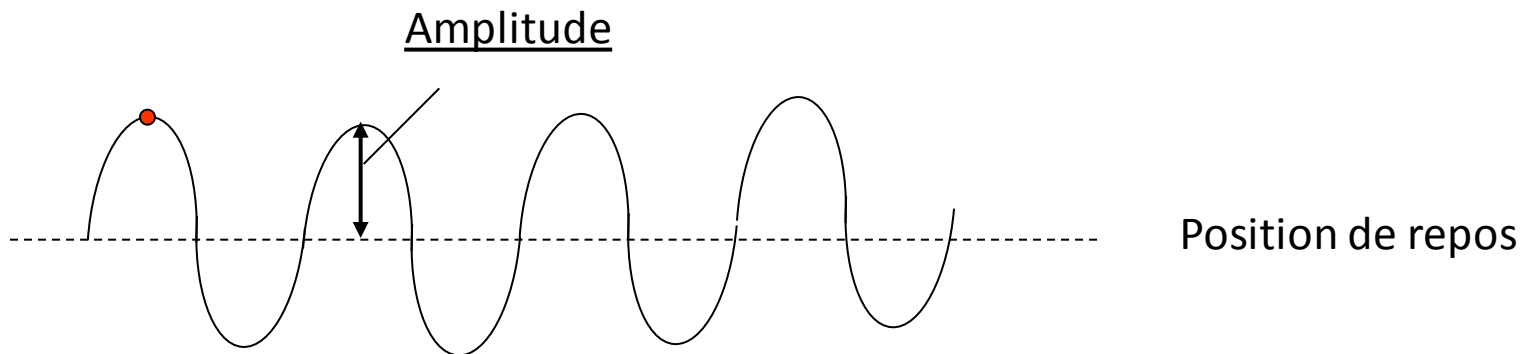


Pour l'onde longitudinale, le point se déplace parallèlement à la propagation de l'onde.

Caractéristiques des ondes

- Amplitude:

Elle représente la distance maximale parcourue par une particule du milieu par rapport à sa position de repos.



- Fréquence:
représente le nombre de cycles par unité de temps.
Son unité est Hz (Hertz)
1 Hz signifie que l'onde effectue 1 cycle par seconde.

Relation entre la longueur d'onde et la fréquence

Pour une onde qui se déplace avec une vitesse V , sa fréquence et sa longueur d'onde sont liées par la formule suivante:

$$V = \text{fréquence} \times \text{longueur d'onde}$$

Exemple:

- Sur la plage, un estivant a remarqué que la vitesse avec laquelle se déplaçaient les vagues était de 10 m/s. Il a aussi noté que la distance qui les séparait était de 15 m. Quelle est la fréquence des vagues?

$$f = \frac{V}{\lambda} = \frac{10 \text{ m/s}}{15 \text{ m}} = 0,67 \text{ Hz}$$

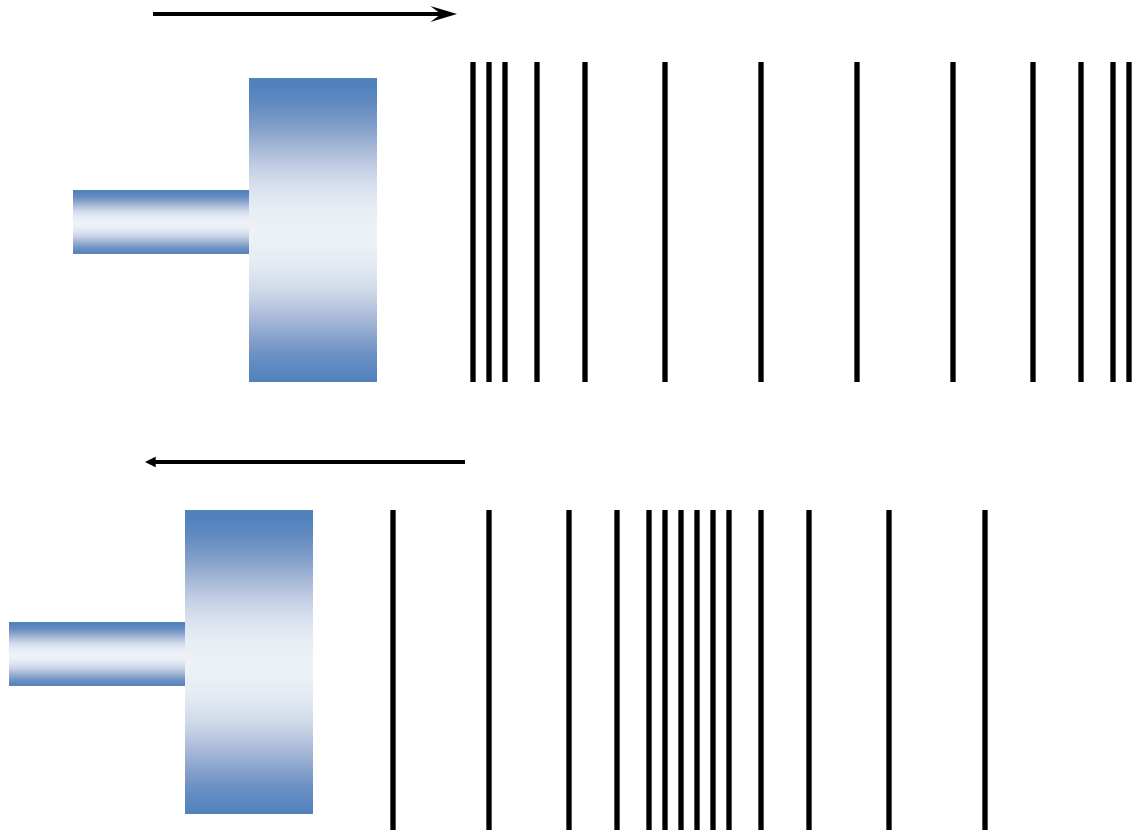
Points essentiels

- L'onde sonore;
- La nature de l'onde sonore;
- La vitesse du son;
- Le niveau de puissance acoustique;
- Le coefficient d'atténuation;
- Réflexion d'une onde sonore;
- Échographie

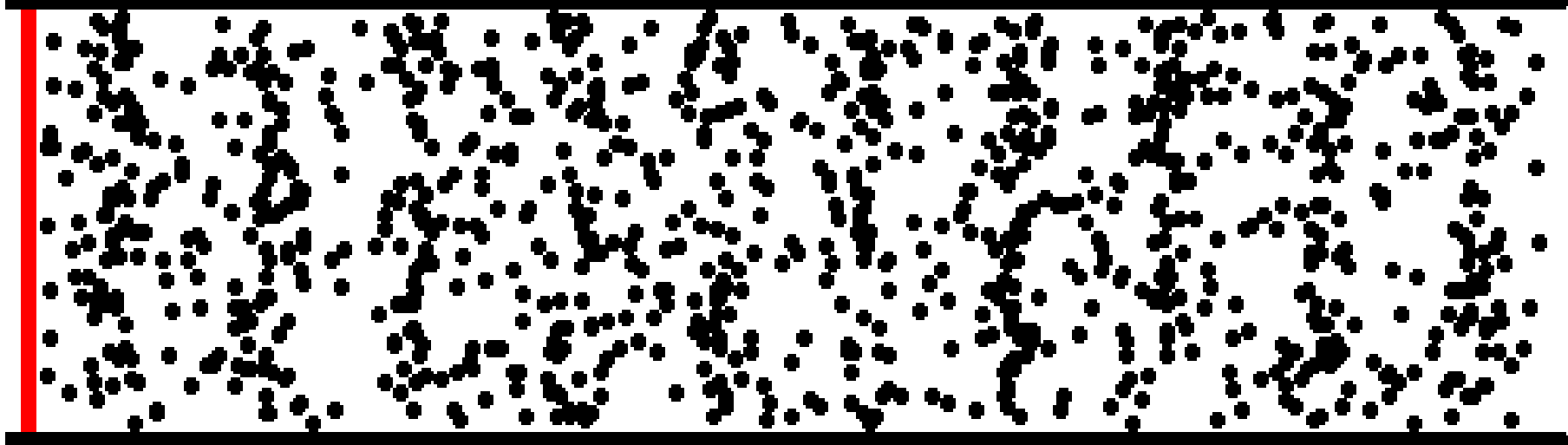
Les ondes sonores

- Le son est une onde mécanique longitudinale produite par la vibration d'un corps et propagée dans le milieu environnant, caractérisées par des fluctuations de densité et de pression
- La vitesse du son varie beaucoup d'un milieu à un autre
- Le son ne se propage pas dans le vide
- L'oreille humaine peut entendre des sons dans l'intervalle des fréquences 30 Hz - 20000 Hz
- L'intervalle des fréquences audible diminue avec l'âge du sujet

Mouvement périodique créant des ondes de pression

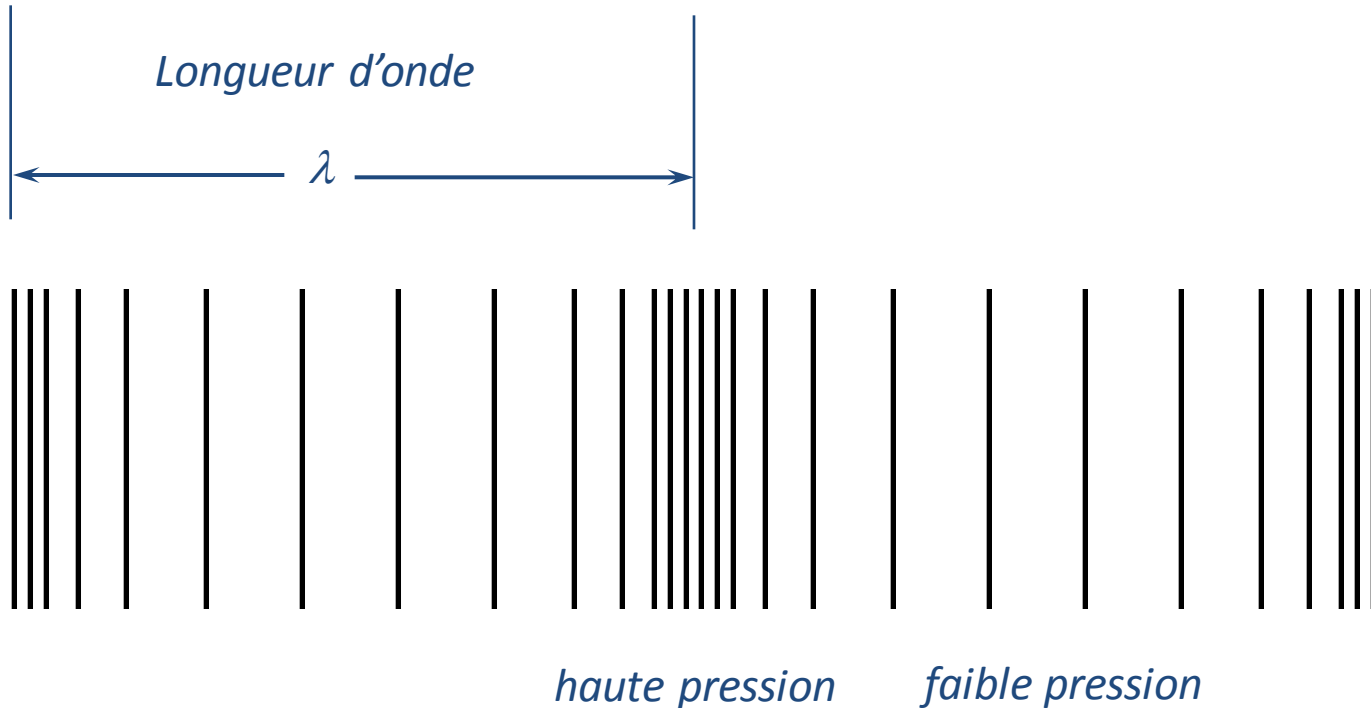


Mouvement périodique créant des ondes de pression

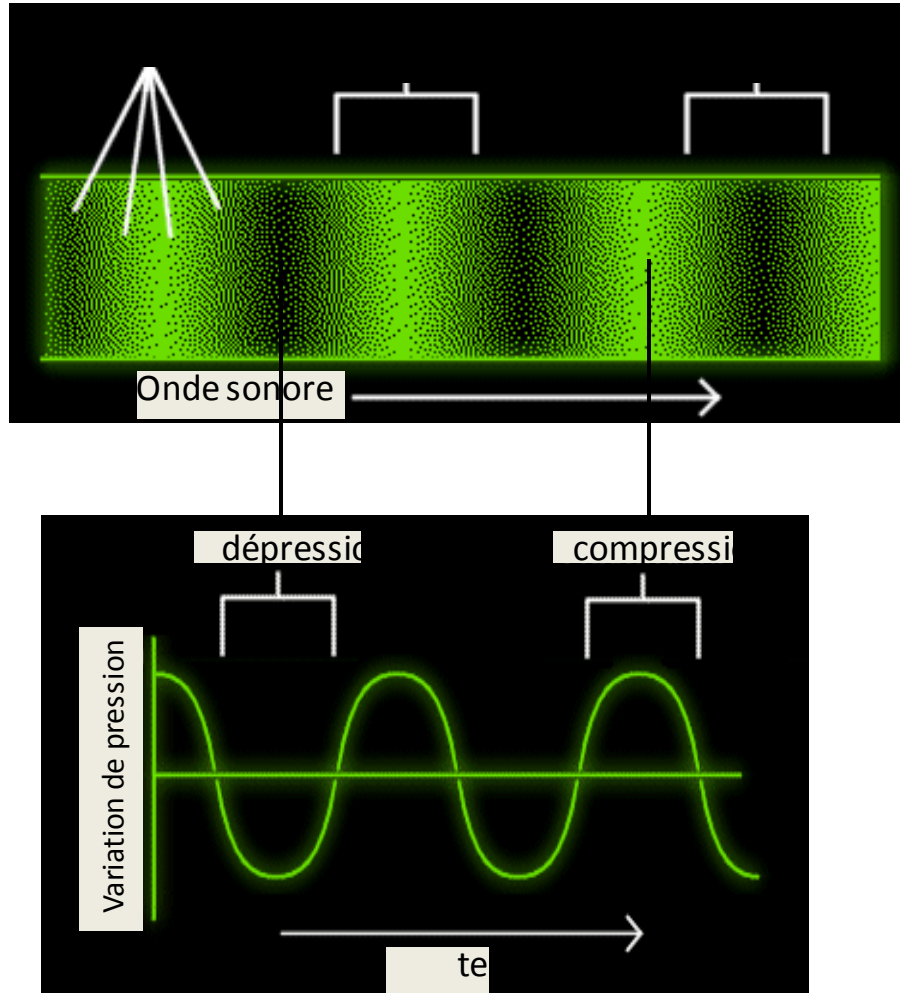


Paramètres de propagation de l'onde sonore

$$\text{Fréquence} = f = 1/T$$
$$\text{Vitesse} = \lambda f$$



Nature de l'onde sonore



En observant la forme sinusoïdale de la figure ci-contre, et en se basant sur le modèle de l'onde progressive, on définit une onde sonore de propagation par:

$$\Delta p = \Delta p_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$\text{où } k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ et } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Domaine de l'onde sonore

Infrasons	$f < 20 \text{ Hz}$
Sons audibles	$20 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$
Ultrasons	$20 \text{ kHz} < f < 20 \text{ MHz}$

L'oreille humaine perçoit les ondes sonores pour les fréquences f comprises entre 20 Hz (son grave) et 20000 Hz (son aigu). Cependant, le domaine du son est beaucoup plus étendu: les vibrations sismiques, certaines machines, des hauts-parleurs de basses fréquences, émettent des fréquences en dessous de 20 Hz: ce sont les *infrasons*.

À l'autre extrémité, on retrouve les ultrasons.

Vitesse de propagation

Substance	Température °C	Vitesse m/s
Gaz		
Gaz carbonique	0	259
Oxygène	0	316
Air	0	331
Air	20	343
Hélium	0	965
Liquide		
Chloroforme	20	1004
Éthanol	20	1162
Mercure	20	1450
eau	20	1482
Solide		
Plomb	-	1960
Cuivre	-	5010
Verre	-	5640
acier	-	5980

Application médicale

Milieu	Vitesse (ms)
air	330
eau	1480
Tissus mous	1540
os	4080

Pour une sonde émettant à 7,5 MHz dans des tissus mous, la longueur d'onde peut être facilement calculée :

$$\lambda = 1540 / 7\,500\,000 = 0,2 \text{ mm}$$

La fréquence de la sonde a un effet direct sur la résolution de l'image échographique.

Propriétés de propagation des ultrasons

- Vitesse de l'onde sonore dans les « *tissus mous* » est pratiquement constante = 1500 m/s.
- Vitesse du son dans les os et dans l'air diffère grandement de la vitesse dans les tissus mous.
- Vitesse = Fréquence x Longueur d'onde
"Ultra"son implique $f > 20 \text{ kHz}$
- Longueur d'onde = Vitesse/Fréquence
- Longueur d'onde $< 1,5 \text{ mm}$

Intensité de l'onde sonore

L'oreille humaine est sensible à des intensités sonores allant de 10^{-12} W/m² à 1 W/m², soit un rapport de 1 à 1 000 000 000 000. Pour ramener cette large échelle d'intensités à une échelle plus réduite qui exprime mieux la sensibilité de nos oreilles aux variations de niveau sonore, on a adopté la notation logarithmique et créé le décibel (dB).

$$\beta = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Où I est l'intensité mesurée et I_0 est une valeur de référence. Si l'on prend I_0 égal à 10^{-12} W/m², le seuil d'audibilité correspond à $\beta = 0$ dB.

L'échelle des décibels

- L'échelle des décibels est une échelle relative qui représente la perception de l'intensité sonore par l'oreille humaine
- 0 dB correspond à un son à peine audible
- 10 dB est un son 10 fois plus intense que celui dans l'intensité est de 0 dB

Échelle des décibels

	Échelle des décibels	Sensation à l'oreille
Avion au décollage	130	Douloureux
Marteau piqueur	120	Douloureux
Concert et discothèque	110	Risque de surdité
Baladeur à volume maximal	100	Pénible
Moto	90	Pénible
Automobile	80	Fatigant
Aspirateur	70	Fatigant

	Échelle des décibels	Sensation à l'oreille
Grand magasin	60	Supportable
Machine à laver	50	Agréable
Bureau tranquille	40	Agréable
Chambre à coucher	30	Agréable
Chuchotement	20	Calme
Vent dans les arbres	10	Calme
Seuil d'audibilité	0	Calme

INTENSITE SONORE

Puissance en dB	Situation
0	Seuil d'audibilité
10	Forêt par temps calme
20	Voix basse
40	Rue d'une grande ville
69	Musique de chambre
90	Moto
120	Tonnerre (seuil douloureux)
130	Avion à réaction (> seuil douloureux)

Formation de l'image

Atténuation

La fréquence des ultrasons a une influence déterminante sur les possibilités d'exploration :

Fréquence des ultrasons	Profondeur d'exploration maximale
2,5 - 3,5 MHz	> 15 cm
5 MHz	10 cm
7,5 MHz	5-6 cm
10 - 12 MHz	2-3 cm

Le coefficient d'atténuation

L'amplitude d'oscillation des ondes sonores décroît avec la distance. Il en résulte une atténuation évidente des ondes à mesure qu'elles traversent les substances. L'intensité I d'une onde varie selon une loi exponentielle:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

où x est la distance en mètre traversée par un son ou un ultrason dans une substance, I_0 est l'intensité initiale, en watt par m^2 , μ est le coefficient d'atténuation de la substance traversée, en m^{-1} .

Exemple

Un ultrason traverse un muscle sur une longueur de 4,0 cm. Si le coefficient d'atténuation des ultrasons dans un muscle vaut $3,3 \text{ cm}^{-1}$, calculez l'intensité relative des ultrasons qui ont traversé cette distance dans le muscle.

Sachant que $I = I_0 e^{-\mu x}$, on a $I/I_0 = e^{-(3,3)(4,0)} = 1,85 \times 10^{-6}$

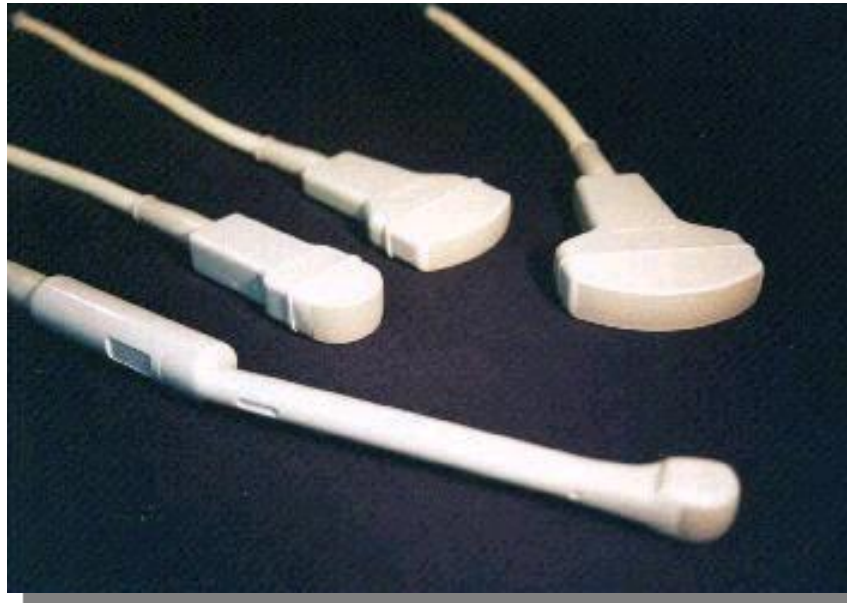
D'où $I_R = 10 \log(I/I_0) = 10 \log (1,85 \times 10^{-6}) = 10(-5,73)$

ou $I_R = -57,3 \text{ dB}$.

Principe de fonctionnement de la sonde

Le transducteur

Un transducteur est un élément qui transforme une forme d'énergie en une autre. Pour les sondes d'échographie, l'énergie électrique est convertie en ultrason et vice versa. Un microphone ou une enceinte réalise le même type de transformation pour les sons audibles. Le transfert d'énergie utilise l'effet piézoélectrique.



Principe de fonctionnement de la sonde

L'effet piézoélectrique

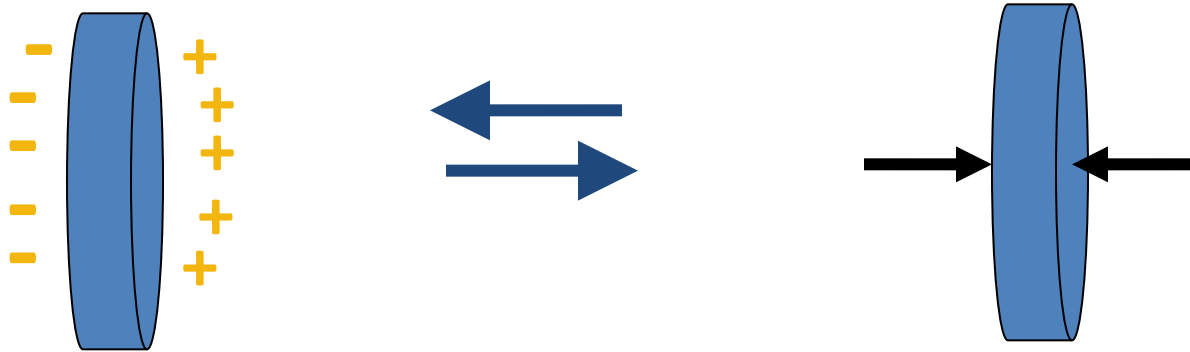
L'effet piézoélectrique a été découvert en 1880 par Pierre et Jacques Curie.

Son principe est que certains matériaux, comme les cristaux de quartz, ont la propriété de se charger lorsqu'ils sont comprimés et, inversement, de se déformer (comprimer) lorsqu'ils sont chargés.

Les transducteurs contenus dans les sondes d'échographie sont généralement des céramiques de Plomb Zirconate de Titane (PZT).

Principe de fonctionnement de la sonde

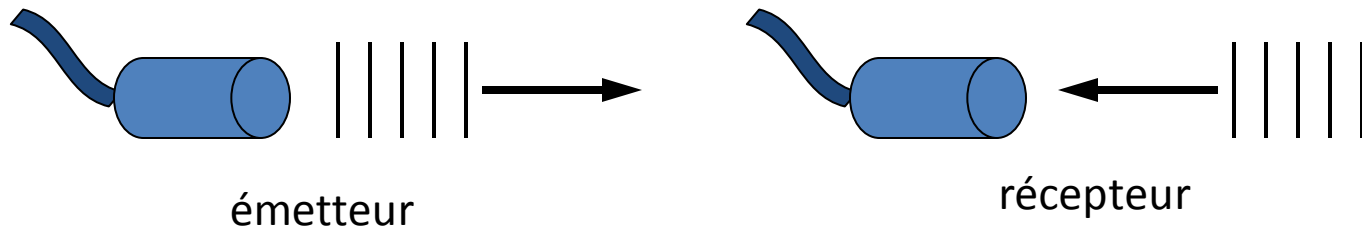
L'effet piézoélectrique (suite)



En appliquant un courant alternatif sur un cristal piézoélectrique, le cristal se comprime et se décomprime alternativement et émet un son dont la fréquence dépend des caractéristiques du cristal. Le même élément est utilisé pour transformer en courant électrique les ultrasons qui reviennent vers la sonde après avoir été réfléchis.

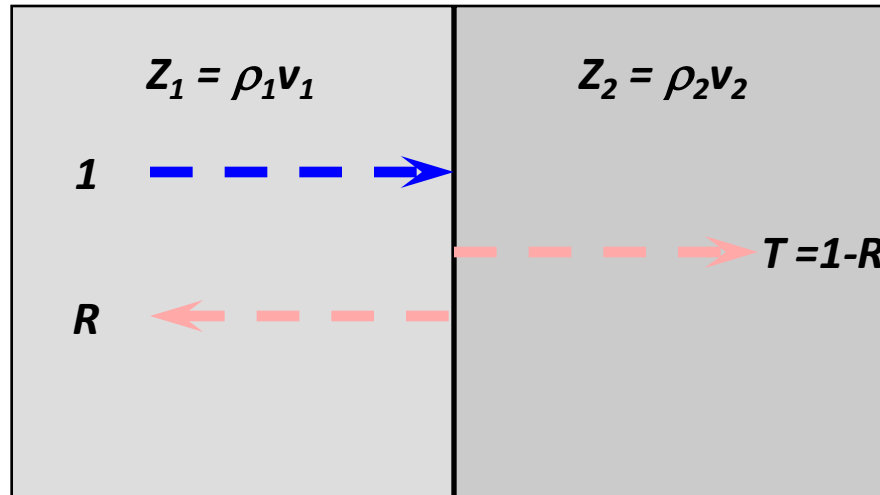
Principe de fonctionnement de la sonde

L'effet piézoélectrique (suite)



La sonde n'émet donc pas des ultrasons en continu, mais en salve. Pendant le reste de temps, la sonde est "à l'écoute" pour capter les ultrasons. La durée des salves est très courte, de l'ordre de quelques microsecondes, et correspond à l'émission de 3 cycles environ en moyenne. La durée de la période d'attente est plus longue, de l'ordre de la milliseconde. La fréquence de répétition du cycle est donc de l'ordre du kHz, ce qui donne l'impression d'une imagerie en temps réel.

Réflexion



Z = impédance acoustique

$$Z = \rho v$$

$$R = [(Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2)]^2$$

où Z : impédance acoustique du milieu, en $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ou rayl

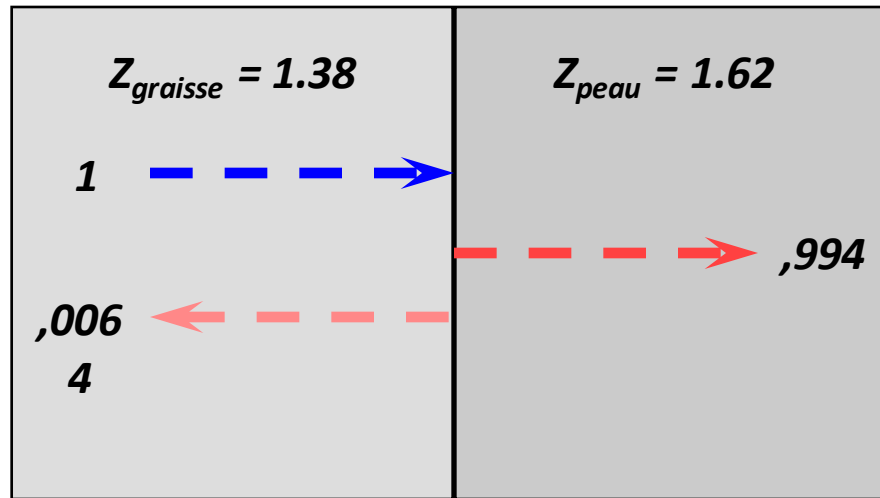
ρ : masse volumique (densité) du milieu, en kg/m^3

v : vitesse de l'ultrason dans ce milieu (m/s)

Tableau d'impédance

Z (en kg/(m ² s) ou rayl)	
air	4×10^{-10}
aluminium	$1,7 \times 10^{-5}$
cerveau	$1,58 \times 10^{-6}$
eau	$1,48 \times 10^{-6}$
graisse	$1,38 \times 10^{-6}$
muscle	$1,70 \times 10^{-6}$
os	$7,80 \times 10^{-6}$
peau	$1,62 \times 10^{-6}$
sang	$1,61 \times 10^{-6}$
tissus mou	$1,63 \times 10^{-6}$

Réflexion: graisse/peau



Exemple

Un ultrason se propageant dans la graisse rencontre la paroi d'un os.
Quelle sera l'amplitude de l'onde réfléchie par cette paroi si l'amplitude de l'onde incidente est de 5 milliwatts par centimètre carré?

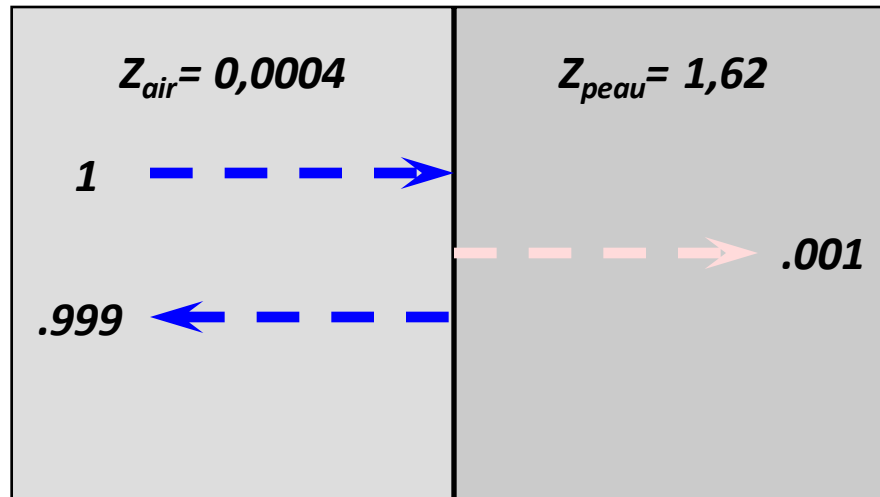
Calcul du coefficient de réflexion

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} = \frac{(1,38 \times 10^{-6} - 7,80 \times 10^{-6})^2}{(1,38 \times 10^{-6} + 7,80 \times 10^{-6})^2} = 0,489$$

Ce coefficient est le rapport entre les amplitudes réfléchie et incidente de l'onde: $R = A_R / A_I$ donc:

$$A_R = R A_I = (0,489)(0,005 \text{ W}) = 0,00245 \text{ W ou } 2,45 \text{ milliwatts.}$$

Réflexion: air/peau



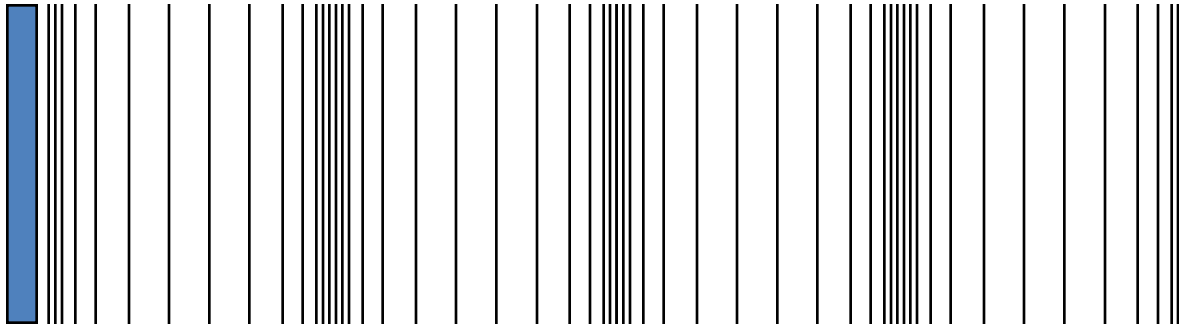
Dans cet exemple, les ultrasons se réfléchissent à 99,9%! L'amplitude transmise est quasi NULLE! Impossible alors de faire pénétrer les ultrasons à l'intérieur du corps humain de cette manière! De là, l'importance de mettre la surface émettrice du transducteur en CONTACT avec la peau des patients en utilisant une huile ou une gélatine dont l'impédance acoustique est voisine de celle de l'épiderme

Propriétés de réflexion des ultrasons

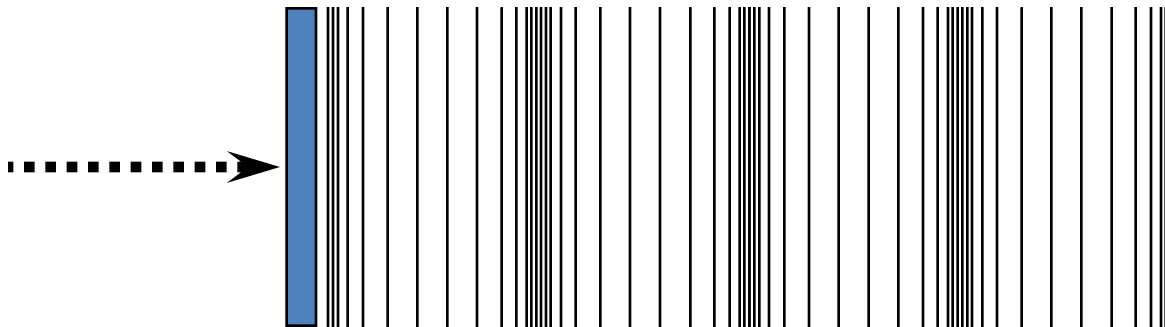
- L'énergie acoustique est réfléchiée à l'intersection de tissus possédant des impédances acoustiques différentes (Z).
- Impédance acoustique = produit de la vitesse du son (v) et de la densité (ρ).
- L'unité de l'impédance acoustique en "Rayl."
- Plus la différence des impédances (Z) est grande, plus l'amplitude de l'onde réfléchiée sera importante.

Effet Doppler

Source stationnaire



Source en mouvement

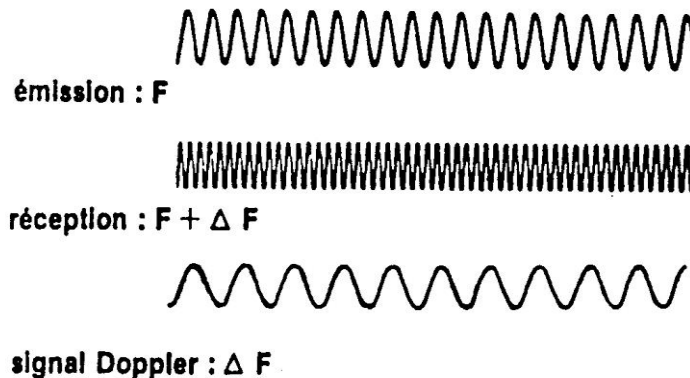


*Diminution de la longueur d'onde
Augmentation de la fréquence*

Principe de l'effet doppler

La vélocimétrie par effet doppler est fondée sur la variation de fréquence que subit un faisceau ultrasonore lorsqu'il est rétrodiffusé par des cibles en mouvement.

$$\Delta f = F_{\text{réception}} - F_{\text{émission}}$$



**La différence de fréquence (ΔF) est positive
si la cible se rapproche de la source. ($F_r > F_e$)
La différence de fréquence (ΔF) est négative
si la cible s'éloigne de la source. ($F_e < F_r$)**

**En pratique médicale,
 ΔF est comprise entre 50 Hz et 20 KHz.
Il s'agit donc d'une fréquence audible.**

Angle doppler

= l'angle qui existe entre le faisceau ultrasonore et l'axe de déplacement de la cible.

$$\Delta f = 2 V f_e \cos \theta / C$$

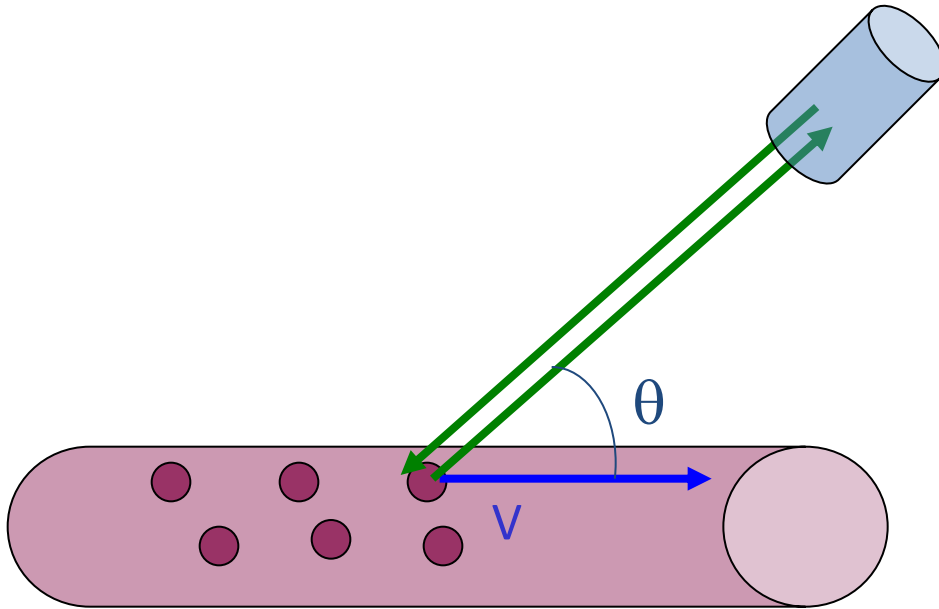
V = vitesse de la cible

C = célérité des ultrasons (1540 m/s)

f_e = fréquence d'émission

θ = angle entre le faisceau ultrasonore et l'axe des particules

Effet Doppler



$$V = \frac{\Delta f c}{2 f_e \cos \theta}$$

**Il faut être tangent
au grand axe du vaisseau.
($\cos 90^\circ = 0$)**

f = fréquence de l'onde émise

v = vitesse de la cible

c = vitesse de l'onde sonore dans le milieu

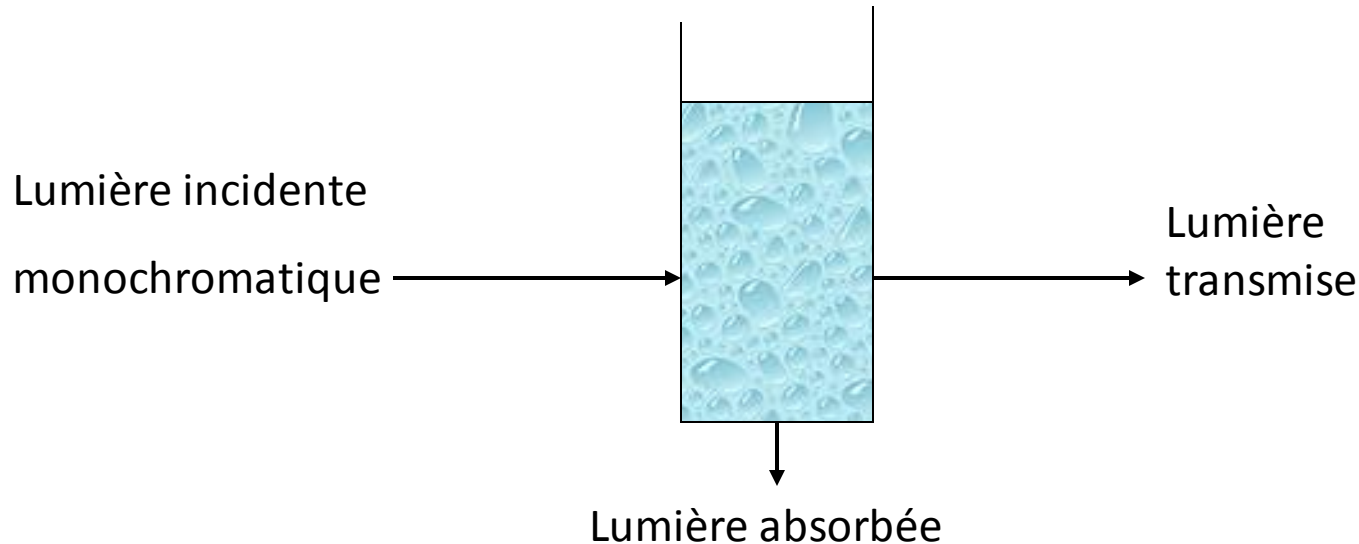
θ = angle entre la ligne de “visée” et la direction du mouvement.

PRODUCTION

- Production des ultrasons de basses fréquences jusqu' à 30 KHz
 - par magnétostriction : la magnétostriction est la faculté que possède un matériau ferromagnétique de vibrer à grande fréquence lorsqu'il est soumis à un champ électrique qui permet de l'aimanter
 - par des céramiques piézoélectriques
- Production des ultrasons de > 30 KHz
par des matériaux piézo-électriques. Actuellement il est très difficile de trouver des quartz et ils sont d'un prix très élevé, on préfère donc utiliser des céramiques. On utilise par exemple des céramiques en titanate-zirconate de baryum qui sont fabriquées par dépôt successifs puis sont polarisées par une DDP très élevée pour avoir des propriétés piézo-électriques. Ces céramiques sont alors reliées à un émetteur de courant alternatif et produisent des US par effet piézoélectrique

Le spectrophotomètre

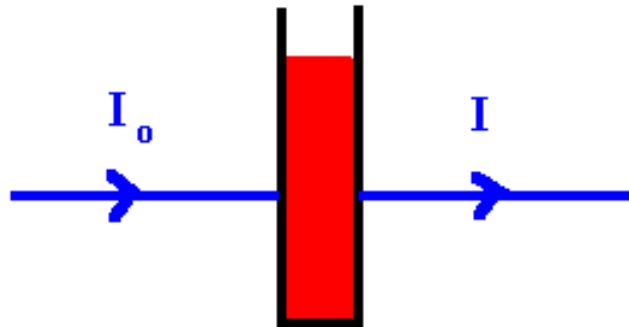
- Une radiation lumineuse monochromatique traverse une longueur l (longueur de la cuve du spectrophotomètre) de solution et mesure l'absorbance A (grandeur liée à la quantité de lumière absorbée par la solution).



Les mesures

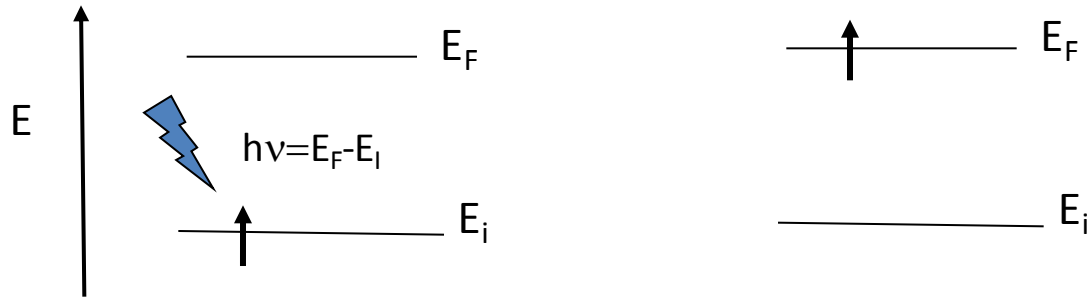
- Il mesure l'absorbance pour une longueur d'onde choisie :

$$A = -\log T = -\log \left(\frac{I}{I_0} \right) \Rightarrow A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right)$$



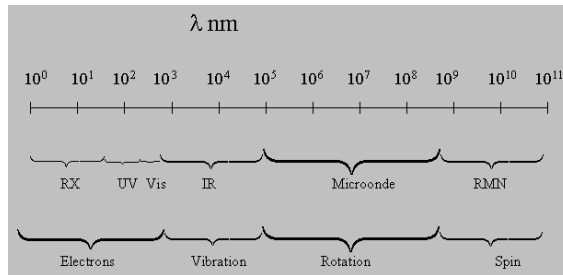
Absorption de la lumière

La matière n'absorbe la lumière que si la lumière a une énergie égale à une transition électronique.

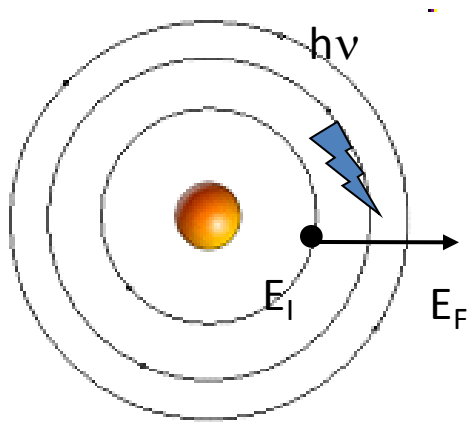


Cette transition est très rapide 10-15s

Absorption des rayons X



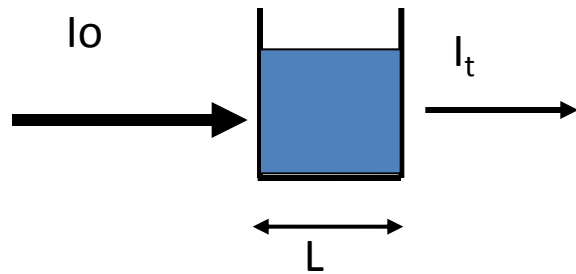
Extraction des électrons des couches électroniques de l'atome



$$h\nu = E_F - E_I$$

Cela demande une grande énergie rayons X

L'absorption: la loi de Berr-Lambert



L'absorption de la lumière est dépendante de:

- la longueur d'onde (transition électronique)
- de la nature chromophore $\varepsilon(\lambda)$
- la concentration (ou densité), C
- la longueur du chemin optique parcouru dx

$dI = -\varepsilon(\lambda) \cdot C \cdot dx \cdot I$ La perte d'intensité pour un petit élément d'épaisseur dx

$$\frac{dI}{I} = -\varepsilon(\lambda) \cdot C \cdot dx$$

$\ln(I) = -\varepsilon(\lambda) \cdot C \cdot L + Cste$ On intègre sur l'épaisseur L

$$I_t = I_0 e^{-\varepsilon(\lambda) \cdot C \cdot L}$$

$$I_t = I_0 e^{-\varepsilon(\lambda) \cdot C \cdot L}$$

L'intensité transmise décroît de façon exponentiel en fonction de la largeur de la cuve et de la concentration.

C'est la loi de Beer-Lambert